

基于 CiteSpace 软件的丛枝菌根真菌近 30 年研究态势分析

王晓燕^{1,2}, 王微¹, 王幼珊^{3*}, 严巧娣¹, 应欣怡¹, 林小靖¹

1 台州学院生命科学学院, 浙江 台州 318000

2 浙江省植物进化生态学与保护重点实验室, 浙江 台州 318000

3 北京市农林科学院 植物营养与资源环境研究所, 北京 100097

摘要: 丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌为植物专性共生真菌, 可与大多数陆生植物共生, 在植物养分吸收、抵御不良环境、维持生态平衡和植物多样性等方面具有重要作用。为了解 AM 真菌研究发展现状, 本文运用 CiteSpace 软件, 对 1990–2020 年 Web of Science 和 CNKI 数据库中的关键词、文献所属国家、机构、期刊、核心文献与作者进行可视化分析。结果表明, 该领域发文量不断增长, 其中美国发文量和中心度最高, 中国发文量位居第二。国际研究机构中, 西班牙高等学术研究委员会中心度最高, 中国科学院发文量最高。通过对核心文献共被引和关键词突现及聚类分析发现, AM 真菌研究领域不断拓展, 研究深度不断增加。20 世纪 90 年代开始, 以新种描述、分类系统不断完善及培养技术改进为主; 在各地菌种资源库逐步建立后, 接种实验及效果评价相关研究逐渐增加; 近年来环境变化的加剧使得重金属、干旱与盐胁迫以及植物修复等成为突现词。AM 真菌共生的分子机理及与其他微生物的相互作用机制也成为当前研究热点。

关键词: CiteSpace 软件; AM 真菌; 文献计量学; 可视化分析; 知识图谱

[引用本文] 王晓燕, 王微, 王幼珊, 严巧娣, 应欣怡, 林小靖, 2022. 基于 CiteSpace 软件的丛枝菌根真菌近 30 年研究态势分析. 菌物学报, 41(5): 802-818

Wang XY, Wang W, Wang YS, Yan QD, Ying XY, Lin XJ, 2022. Analyses of the research status of arbuscular mycorrhizal fungi in the last 30 years based on CiteSpace software. Mycosystema, 41(5): 802-818

基金项目: 台州学院杰出青年项目(2019JQ005); 北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20200104); 浙江省基础公益研究计划项目(LGN19C150004); 浙江省自然科学基金(LTY22C030004); 台州市大学生科技创新项目(2021)

Supported by the Taizhou University Outstanding Youth Program (2019JQ005), the Science and Technology Innovation Capacity Construction Project of Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences (KJCX20200104), the Basic Public Welfare Research Projects in Zhejiang Province (LGN19C150004), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LTY22C030004), and the Science and Technology Innovation Project for College Students of Taizhou City (2021).

*Corresponding author. E-mail: wangyoushan5150@163.com

Received: 2021-10-30, accepted: 2021-11-17

Analyses of the research status of arbuscular mycorrhizal fungi in the last 30 years based on CiteSpace software

WANG Xiaoyan^{1,2}, WANG Wei¹, WANG Youshan^{3*}, YAN Qiaodi¹, YING Xinyi¹, LIN Xiaoqing¹

¹ School of Life Sciences, Taizhou University, Taizhou 318000, Zhejiang, China

² Zhejiang Provincial Key Laboratory of Plant Evolutionary Ecology and Conservation, Taizhou 318000, Zhejiang, China

³ Institute of Plant Nutrition, Resources and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

Abstract: Arbuscular mycorrhizal (AM) fungi are obligate symbiotic fungi of plants. They can establish symbiosis with most terrestrial plants and play an important role in plant nutrient absorption, tolerance of adverse environments, and maintenance of ecological balance and plant diversity. To reveal the status of AM fungal research, CiteSpace software was used to visually analyze the keywords, countries, institutions, journals, core literature and core authors associated with literature indexed in the Web of Science and CNKI databases from 1990 to 2020. Our results show that the number of publications in this field is constantly increasing. The United States hold the highest number of publications and the greatest prominence, and China ranks second in number of publications. Among international research institutions, the Spanish National Research Council (CSIC) wins the highest reputation, while the Chinese Academy of Sciences publishes the greatest number of publications. Co-citation, keyword burst and cluster analysis of the core literature show that the research field of AM fungi is expanding and the research depth degree is increasing. Since the 1990s, novel species descriptions and classification systems are largely changed and amended, and culture techniques are improved. A considerable number of resource banks, herbaria or culture collections are established in various countries. Inoculation experiments and evaluation of inoculation results gradually develop. In recent years, key words concerning aggravated environmental changes caused by heavy metal pollution, drought stress, and salt stress and plant repair continue to increase. The molecular mechanisms of AM fungal symbiosis and interactions of AM fungi with other microorganisms have also become hot research topics.

Keywords: CiteSpace; AM fungi, bibliometrics; visual analysis; knowledge map

丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌为球囊菌亚门 Glomeromycotina 活体植物专性共生真菌(Spatafora *et al.* 2016), 约占土壤微生物总生物量的 50% (Prasad *et al.* 2017)。化石证据和 DNA 序列分析推断 AM 真菌起源于 4.0–4.6 亿年前, 与第一批陆生植物同时出现在地球上 (Simon *et al.* 1993)。自 1894 年 Frank 第一次提出菌根概念以来, 大量研究表明 AM 真菌能与 80% 的陆生植物形成共生关系 (Smith & Read 2008; Schüßler & Walker 2011; Prasad *et al.*

2020)。

AM 真菌孢子在植物所分泌信号物质的诱导下萌发并侵入植物根系, 并在根系皮层细胞内形成丛枝(arbuscule)、泡囊(vesicle)和胞间菌丝等结构。丛枝是 AM 真菌与植物交换光合产物和矿质养分的界面, 由植物激素(如独脚金内酯)刺激产生 (Akiyama *et al.* 2005; Morgan & Connolly 2013)。AM 真菌通过庞大的菌丝网络将植物根际以外的水分和矿质养分通过无隔菌丝中的原生质流传递给宿主植物, 宿主植

物则将高达 20% 的光合产物提供给 AM 真菌 (Karandashov & Bucher 2005)。AM 真菌共生不仅能促进宿主植物生长和对土壤中矿质养分的吸收 (Marschner & Dell 1994; 陈梅梅等 2009; Zavalloni *et al.* 2012; Chen *et al.* 2020; Jiang *et al.* 2021); 还能缓解干旱 (Nouri *et al.* 2020; Liu *et al.* 2021)、盐分 (Porcel *et al.* 2012; Navarro *et al.* 2014; Krishnamoorthy *et al.* 2016)、病虫害 (刘润进和陈应龙 2007; Bagy *et al.* 2019) 和重金属 (王发园和林先贵 2007; Riaz *et al.* 2021) 等环境胁迫对宿主植物的影响, 而且对植被恢复、群落生物多样性和稳定性的维持起重要作用 (Zavalloni *et al.* 2012; Wang *et al.* 2017; Chen *et al.* 2020)。

国际上 AM 真菌研究大致经历 3 个阶段。19 世纪初到 20 世纪初, 研究集中于 AM 真菌的分离鉴定、分类系统的初步建立和接种效应评价; 20 世纪初到 21 世纪初, 研究逐渐转向 AM 真菌与植物共生机理, 依据形态特征建立的分类系统也日趋成熟; 21 世纪以来, 分子生物学技术的发展与渗透, 使 AM 真菌分类概念和分类方法有了长足发展, 同时也产生一些分歧, 至今仍未形成统一的分类系统。研究方向由 AM 真菌单一类群向多类群菌种 (例如根瘤菌、解磷细菌等促生细菌) 互作发展 (龙伟文等 2000; Sharma & Sharma 2016; Hidri *et al.* 2019)。研究主题逐渐向各领域渗透, 其中包括农业领域中菌肥的开发利用 (Rocha *et al.* 2019; Paskovic *et al.* 2021) 以及菌根植物对高盐 (Porcel *et al.* 2012; Navarro *et al.* 2014; Krishnamoorthy *et al.* 2016)、干旱 (Subramanian *et al.* 2006; Chitarra *et al.* 2016; Liu *et al.* 2021) 等胁迫环境的耐受; 环境学领域中 AM 真菌对重金属等污染物质的吸收转化 (陈保冬 2002; Wang *et al.* 2017)。AM 真菌对宿主专一性不高的特性也引发了 AM 真菌对不同植物 (包括入侵植物和本地植物) 种间关系的研究 (Ren *et al.* 2017; Cheng *et al.* 2019;

Li *et al.* 2019; Dong *et al.* 2021)。国内 AM 真菌研究起步较晚, 但近 30 年来发展迅速, 已形成一些特色研究体系。

本研究运用文献数据可视化应用软件 CiteSpace 对 1990–2020 年中国知识基础设施工程 (China National Knowledge Infrastructure, CNKI) 核心数据库收录的中文文献和 Web of Science (WOS) 核心集收录的英文文献进行统计分析。利用图形学、信息科学等学科理论与计量学引文、共现分析等研究方法, 结合可视化图谱展现 30 年来国内外 AM 真菌研究概况。从研究发展趋势、关键词聚类、研究区域和机构分布、核心作者和期刊发表情况等方面分析了中英文文献对 AM 真菌领域的研究。

1 数据来源与统计方法

1.1 数据来源

本文基于 AM 真菌研究视角, 选取 WOS 与 CNKI 分别作为英文和中文文献研究数据。根据 SCI 论文中关于“丛枝菌根真菌”这个主题词的常用英文书写, 编制检索式: TS=(“Arbuscular mycorrhizal fung*” OR AMF OR “AM fungi” OR “mycorrhizal network*” OR “arbuscular mycorrhiza” OR “vesicular-arbuscular mycorrhiza” OR “V-A mycorrhizal fung*”) OR TI=(“Arbuscular mycorrhizal fung*” OR AMF OR “AM fungi” OR “mycorrhizal network*” OR “arbuscular mycorrhiza” OR “vesicular-arbuscular mycorrhiza” OR “V-A mycorrhizal fung*”) OR AB=(“Arbuscular mycorrhizal fung*” OR AMF OR “AM fungi” OR “mycorrhizal network*” OR “arbuscular mycorrhiza” OR “vesicular-arbuscular mycorrhiza” OR “V-A mycorrhizal fung*”)。文献类型选择 “Article” 和 “Review”, 共检索 1990–2020 年 AM 真菌研究领域发表的文献 16 141 篇 (检索时间为 2021 年 5 月 20 日)。通过 CiteSpace 自带的文献去重功能结合手动剔除无关文献的方法, 对文献进行精炼, 共得到关键文献 13 531 篇。由于 CNKI 中数据来源期刊众

多,层次不一,为高质量展示 AM 真菌研究进展,将期刊范围缩小至北大核心期刊与中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊,依据 AM 真菌在 CNKI 中的不同关键词,在专业检索框中设定检索式为:SU=‘丛枝菌根真菌’OR SU=‘丛枝菌根’OR SU=‘AM 真菌’OR SU=‘AMF’OR SU=‘VA 菌根真菌’OR SU=‘泡囊-丛枝菌根真菌’OR AB=‘丛枝菌根真菌’OR AB=‘丛枝菌根’OR AB=‘AM 真菌’OR AB=‘AMF’OR AB=‘VA 菌根真菌’OR AB=‘泡囊-丛枝菌根真菌’OR AB=‘丛枝菌根真菌’OR KY=‘丛枝菌根’OR KY=‘AM 真菌’OR KY=‘AMF’OR KY=‘VA 菌根真菌’OR KY=‘泡囊-丛枝菌根真菌’。时间跨度 1990–2020 年,精确检索结果 2 705 个。对检索结果去重,删除无关条目,最终得到中文文献 2 234 篇。

1.2 研究方法

CiteSpace 知识图谱是由美国德雷塞尔大学教授陈超美开发,用来分析、挖掘科学文献中蕴含的潜在知识,并在科学计量学、数据和信息可视化背景下逐渐发展起来的一款多元、分时、动态的引文可视化分析软件(李杰和陈超美 2016;宋洁和刘学录 2019)。该软件不仅能直观展示每个节点在知识网络中的位置与大小,还可通过不同的功能选择,分析相关领域研究文献的来源地区、研究学者、研究热点及其演变情况,是当前应用最广的知识图谱绘制工具之一(祝薇等 2018;宋洁和刘学录 2019)。本文借助 CiteSpace 5.8.R3 版本软件的合作网络共现及共被引分析等功能,对 AM 真菌研究领域内 1990–2020 年的文献进行分析并绘制相应知识图谱来探究研究前沿及热点问题。

1.3 数据处理

运用 Origin 8.0 分别绘制年发表文献量随时间变化柱状图。运用 CiteSpace 软件分析数据,时间跨度选择 1990–2020 年,时间切片为 1 年,节点分别选择国家、机构、共被引期刊、领域

作者、共被引文献及关键词,阈值设置为 Top N=50 per slice,即提取每个时间切片中排名前 50 的对象。并通过寻径网络算法(pathfinder network scaling)对网络进行合并与修剪。根据研究需要分别选择聚类视图(cluster view)或共现视图(co-occurrence view)。聚类视图采用对数似然算法(LLR)进行聚类命名。生成并保存图谱后,通过图谱节点数量和年轮、频次、突现强度、中心度(centrality)和同质性(silhouette)等指标对知识图谱进行解读,把握 AM 真菌研究领域的发展规律。其中中心度指经过某个节点连接另外两个节点的最短路径线占这两个节点之间最短路径线之比,体现文献在网络结构中的重要性,通常把中心度>0.1 的节点称为关键节点(项国鹏等 2016)。同质性代表聚类集群的相似度。S 值在 0–1 之间,S 越接近 1 说明类群内部相似程度越大,聚类的主题越明确,研究者关注这个问题越集中。一般认为 S>0.5 表明聚类合理(陈悦等 2015)。突现强度用于识别研究的新趋势,体现关键词在研究时段内出现频次的骤增程度,突现强度越高,研究主题越热门(宋洁和刘学录 2019)。

2 结果与分析

2.1 发文量变化趋势

1990–2020 年间,AM 真菌研究领域的英文发文量总体呈快速上升趋势(图 1)。依据文献波动情况可分为平稳发展阶段(1990–2006 年)和快速发展阶段(2007–2020 年)。1990–2006 年年发文量变化范围为 43–348 篇,该时期研究集中于植物侵染状况调查、菌种分离、接种及宿主植物对矿物质养分(以磷为主)的吸收。2007 年以后该领域研究呈快速增长趋势,2019 和 2020 年发文量分别高达 1 209 和 1 237 篇。这主要得益于 3 个方面:一是植物-土壤反馈理论的逐步完善使研究人员对 AM 真菌重要作用的认识越来越深刻;二是国际性和地区性 AM 真菌种质资源

库的建立使 AM 真菌菌种的获得变得快捷容易, 研究人员不再需要自己耗费时间精力专门分离菌种; 三是 AM 真菌专用引物的不断发表、高通量测序及磷脂脂肪酸检测技术的发展使得其他学科的研究人员可以将 AM 真菌纳入其研究体系。

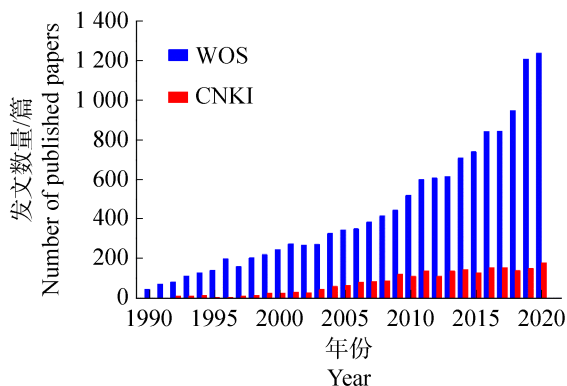


图1 1990–2020年丛枝菌根真菌研究文献年发表量时间分布

Fig. 1 Temporal distribution of annual publications on AM fungi from 1990 to 2020. CNKI: China National Knowledge Infrastructure; WOS: Web of Science.

中文文献在这方面增长表现为3个阶段: 发展期(1990–2000)、增长期(2001–2009)和波动期(2010–2020)。在发展期, 中国AM真菌研究从1990年以前的起步阶段进入发展阶段, 年发文量从0篇增加到24篇, 年平均发文量10篇。研究集中于菌种资源调查以及果蔬等经济作物和林地AM真菌的应用, 少量研究开始探索AM真菌对植物养分吸收的机制。2001年开始, 该领域发文进入增长期, 年发文量从29篇增加到119篇, 平均发文量65篇。该时期对AM真菌接种研究的范围逐步扩展, 对逆境胁迫抵抗的研究开始出现。2010年以后进入波动期。年发文量108–177篇, 这一时期对AM真菌与宿主植物抗逆性(例如重金属、盐、干旱和温度等胁迫)关系的研究大量涌现。对中国特定区域和环境(例如喀斯特地貌区、内蒙古风沙区、内蒙古草原、金属和煤矿采矿区等)的AM

真菌调查及应用研究逐渐增加, 同时在各研究机构 and 高校形成特色研究方向。

2.2 研究热点及趋势

2.2.1 突现词趋势分析

用CiteSpace中依据探测频率突增的算法, 运用突现性检测(burst detection)功能, 对研究主题在短期内突然呈现急速增长的状态进行检测, 以识别新的研究趋势。将时间切片设置为1年, 将同义词合并分别得到41和31个英文和中文文献突现词(表1)。

英文文献根据突现词主题大致经历了: 调查与描述、培养与机理和功能与应用3个依次出现又互相交叉的阶段: 调查与描述阶段主要为1990–2005年, 该时期研究集中于不同环境和宿主中AM真菌形态学分类调查及基本功能描述。菌根侵染率是大多数调查的基本指标, 而孢子是形态学分类的对象, 因而infection(侵染)和spores(孢子)具有最高的突现强度和较长的持续时间。早期基本功能的探究集中于对土壤中磷酸盐的利用, 因而phosphate(磷酸盐)也具有较高的突现强度。这个阶段早期, 对豆科固氮植物接种AM真菌的研究大量出现; 到后期, 研究逐渐转向宿主植物与AM真菌间信号分子的识别, 对菌根形成信号途径的研究表明其与豆科植物共享固氮过程中的结瘤信号部分途径, 因此nitrogen fixation(氮固定)和nodulation(结瘤)成为这段时间的突现词。期间所用菌种以*Gigaspora margarita*为主, 所用宿主以豆科植物*Trifolium subterraneum*为主。该时期形态分类相关的词, 例如morphology(形态学), classification(分类)和Glomale(球囊霉目)等出现较多, 其中球囊霉属*Glomus*突现强度最高, 且一直持续到2007年, 这与*Glomus*属在1845年被提出后, 形态学鉴定的大多数AM真菌被归入该属有关(王幼珊等2012)。内囊霉科Endogonaceae突现强度较高, 但是只持续到2000年, 这是因为1989年设立球囊霉科

表 1 突现词信息表

Table 1 Information of burst words

关键词 Keywords	突现强度 Burst strength	持续时间 Duration	关键词 Keywords	突现强度 Burst strength	持续时间 Duration
Germination	22.73	1990–1999	球囊霉属	7.23	1994–2003
Infection	207.73	1990–2004	新记录种	6.63	1994–2007
<i>Gigaspora margarita</i>	30.41	1991–2004	接种效应	3.98	1998–2007
Spores	57.24	1991–2005	矿质营养	4.91	1999–2006
Nitrogen fixation	13.48	1991–2006	孢子密度	4.45	2005–2010
Growth response	12.07	1991–2007	油蒿	3.67	2007–2009
Phosphate	41.76	1991–2008	时空分布	4.54	2007–2011
Nodulation	20.30	1991–2008	生长效应	4.31	2007–2011
Morphology	20.30	1992–2003	施氮量	3.81	2008–2012
<i>Glomus</i>	42.84	1992–2007	葡萄	5.29	2009–2010
Classification	9.62	1993–1997	丛枝菌根真菌	4.93	2009–2010
<i>Trifolium subterraneum</i>	22.19	1993–2005	产量	3.7	2009–2011
External hyphae	97.73	1993–2006	烤烟	4.59	2010–2014
<i>In vitro</i>	32.78	1993–2007	连作	3.71	2013–2016
Phosphorus	30.68	1993–2007	根系形态	4.64	2013–2017
<i>Glomus mosseae</i>	37.05	1994–2010	球囊霉素	4.85	2013–2020
<i>Zea mays</i>	13.98	1995–2000	玉米	8.3	2016–2017
Transport	42.89	1996–2008	群落结构	9.6	2016–2020
Glomale	32.07	1997–2010	间作	7.47	2016–2020
<i>Medicago truncatula</i>	5.45	2005–2020	多样性	7.42	2016–2020
Tomato	17.68	2007–2011	滇重楼	7.22	2016–2020
Community structure	16.19	2008–2015	干旱胁迫	6.4	2016–2020
Field	16.69	2009–2012	抗氧化酶	5.75	2016–2020
Ecosystem	21.69	2009–2018	土壤养分	5.59	2016–2020
<i>Glomus intraradices</i>	16.28	2010–2014	喀斯特	5.35	2016–2020
Grassland	21.03	2011–2015	光合作用	4.45	2016–2020
Wheat	13.41	2012–2013	根际土壤	3.52	2016–2020
Functional diversity	16.77	2012–2014	紫花苜蓿	6.72	2017–2020
Nutrition	17.56	2012–2017	植物修复	4.58	2017–2020
Gene expression	23.40	2012–2020	盐胁迫	4.74	2018–2020
Glomeromycota	21.01	2014–2015	生物量	4.23	2018–2020
Molecular diversity	20.15	2014–2016			
Stress	51.05	2015–2018			
Fertilization	32.87	2015–2020			
Land use	23.52	2016–2017			
Yield	70.82	2016–2020			
Microbial community	42.54	2016–2020			
Forest	19.39	2016–2020			
Drought	18.39	2016–2020			
Heavy metal	32.25	2017–2020			
Management	18.78	2017–2020			

Glomaceae 后, Endogonaceae 的使用逐渐减少和停用(王幼珊等 2012)。培养体系与机理研究发展阶段主要为 1993–2010 年, 此时多种培养体系建立(Brundrett *et al.* 1996)。除传统盆栽培养外, 较多研究开始运用离体培养技术和分室隔网培养体系研究菌丝在养分传输过程中的作用, 因而 *in vitro* (离体), external hyphae (外生菌丝), transport (转运), phosphorus (磷)等成为该阶段突现词。这些培养体系的改进为 AM 真菌与宿主共生机理的研究提供了基础手段(Cassells *et al.* 1996; Declerck *et al.* 1998)。该阶段使用频率较高的菌种 *Glomus mosseae* 具有较高的突现强度和较长的持续时间, 这与该菌种容易扩繁且功能强大有关。功能与应用阶段主要开始于 2010 年, 该阶段突现强度较高的词有 yield (产量)、stress (胁迫)、heavy metal (重金属)、land use (土地利用)和 fertilization (施肥), 说明该阶段研究方向已从 AM 真菌本身及对养分的利用转向提高宿主产量和对胁迫环境(特别是重金属)的抵抗。而研究范围也从宿主植物和 AM 真菌向整个土壤微生物群落转变, 因此 microbial community (微生物群落)也成为这个阶段的突现词。对近 3 年的突现词单独分析发现, 随着越来越多的菌种实现基因组测序和多组学分析, *Glomus intraradices*、*Medicago truncatula* 和 Gene expression (基因表达)成为突现词, 表明该领域菌种和宿主植物集中于上述两个物种, 研究内容深入分子领域, 既包括宿主植物基因表达的研究, 也包括 AM 真菌作用的分子机理 (Wang *et al.* 2017; Xue & Wang 2020)。

对中文文献突现词分析发现, 1994 年才开始出现突现词。与英文文献类似, 研究早期也以 AM 真菌分类为主, 因此球囊霉属和新记录种具有最高的突现强度, 且新记录种一词一直持续到 2007 年, 说明这个阶段在国内不断有新记录种发表。国内对 AM 真菌接种效应的研究集中于 1998–2007 年, 因而接种效应和矿质营

养为该阶段突现词。从 2005 年开始, AM 真菌野外分布调查大量出现, 而孢子密度是反映 AM 真菌丰度最常见的指标。因此, 2005–2011 这个时间段孢子密度和时空分布两个词表现出较高的突现强度。对 AM 真菌在不同经济作物方面的应用的研究集中于 2009–2015 年, 该阶段有多种作物, 例如葡萄、烤烟和玉米成为突现词, 同时反映接种效应的指标(产量)也成为这个时期的突现词。这与 2003 年中国“丛枝菌根真菌种质资源库”(Bank of Glomeromycota in China, BGC)的建立有关, 该资源库不断分离培养并为中国各研究机构提供菌种。从 2011 年起, 研究开始关注不同环境条件下 AM 真菌对宿主植物胁迫抵抗的作用。该时期代表环境条件的干旱胁迫、盐胁迫、间作、连作和植物修复等成为突现词, 且大部分突现词一直持续至今。2016 年以来, 高通量测序的发展和测序成本的降低, 以及 AM 真菌涉及领域的拓展, 使对不同生境条件下 AM 群落及相关微生物群落的研究爆发式增长, 因而群落结构和多样性呈现较高的突现强度。

2.2.2 关键词聚类分析

关键词聚类可以反映主要的研究方向及该方向的关键主题。对中英文文献关键词采用对数似然算法(LLR)分析后分别形成 9 个和 19 个聚类(图 2)。针对每个聚类编号, 从众多聚类标签中选出代表不同研究方向的关键词并列出(表 2, 表 3)。英文文献聚类的平均年份较早, **聚类#0** 包括 diversity (多样性)、am fungi (AM 真菌)、community (群落)等关键词, 该方向主要涉及不同生态系统中 AM 真菌群落多样性调查, 该研究方向跨越的时间尺度较大, 从传统的形态学分类到分辨率逐步提升的高通量测序, 使得对不同环境和实验处理条件下 AM 真菌群落结构变化的分析越来越方便。**聚类#1** 包括研究过程中常见的菌种 *Gigaspora margarita* 及其相关的运用, 包括原位培养(Tiwari & Adholeya

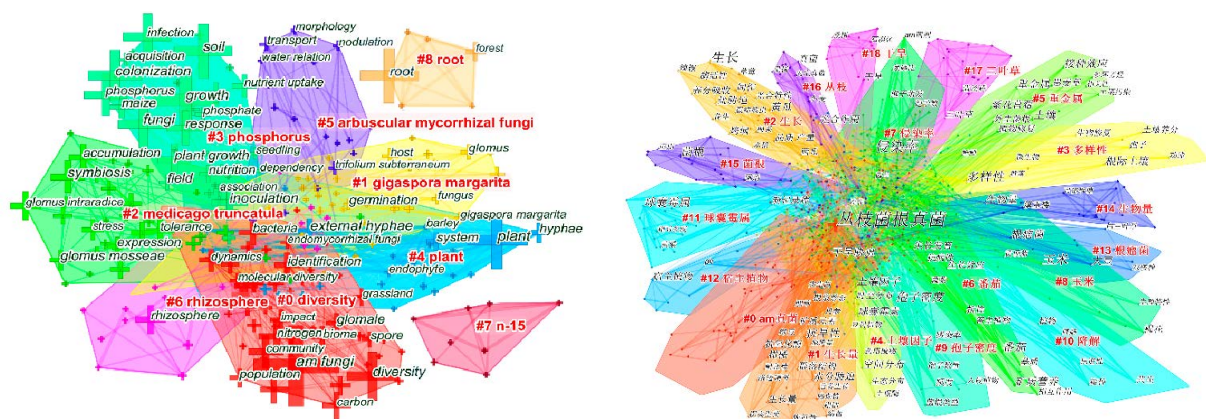


图 2 关键词聚类图

Fig. 2 Keyword clustergram.

表 2 英文文献关键词聚类一览表

Table 2 The list of keywords clustering in English articles

编号	聚类大小	同质性	年份	聚类标签
ID	Size	Silhouette	Year	Label (LLR)
#0	52	0.660	1999	Diversity; am fungi; nitrogen; community; carbon; bacteria; identification; bioma; dynamics; organic matter
#1	39	0.627	1992	Gigaspora margarita; host; Glomus; photosynthesis; nitrogen fixation; germination; in vitro; vegetation; clover; soil disturbance
#2	38	0.523	2000	Medicago truncatula; symbiosis; Glomus intraradices; tolerance; accumulation; Glomus mosseae; stress; resistance; heavy metal; gene expression
#3	37	0.671	1993	Phosphorus; growth; colonization; inoculation; response; plant growth; nutrient uptake; maize; yield; field
#4	28	0.811	1992	Plant; external hyphae; system; Endogonaceae; endophyte; Glomus fasciculatum; in vitro; classification; tillage; taxonomic concept
#5	21	0.744	1993	Arbuscular mycorrhizal fungi; transport; Trifolium subterraneum; nodulation; morphology; water relation; Zea may; citrus; nitrate; phosphorus nutrition
#6	19	0.801	1992	Rhizosphere; microorganism; population variation; quantification; enrichment; biosynthesis; salinity; calcium oxalate; abscisic acid; hydraulic conductivity
#7	8	0.939	1990	N ¹⁵ ; fixation; natural vegetation system; n transfer; ryegrass; sand dune; florida coalwaste
#8	6	0.984	1990	Root; forest; ecology; Agropyron; environment; functional relationship

2002)、接种对宿主植物光合作用(Mathur & Vyas 1995)等的研究, 目前该种全基因组测序的完成(Venice *et al.* 2020)为其生物特性及其与宿主植物相互作用机理的深入研究提供条件。**聚类#2**主要研究方向为接种 AM 真菌对植物胁迫抵抗的研究。其中利用宿主植物 *Medicago truncatula* 和菌种 *Glomus intraradices* 与 *Glomus mosseae* 开展的研究较多。目前研究较多的胁迫包括重金属、干旱和盐分等; 常见的测定指标

除了抗氧化酶活性之外, 对于抗性基因表达的研究成为探究 AM 真菌作用机理的重要途径。**聚类#3、#5 和#7**主要以 AM 真菌接种对植物生长和养分吸收的效应研究为主, 因此植物指标 plant growth (植物生长)和 yield (产量), 与表示养分吸收和转运的指标 phosphorus (磷)、nitrate (硝酸盐)、nutrient uptake (养分吸收)和 n transfer (氮转运)等是主要关键词。在 AM 真菌对植物氮吸收的研究中, N¹⁵ 是研究氮吸收、转

表3 中文文献关键词聚类一览表
Table 3 The list of keywords clustering in Chinese articles

编号 ID	聚类大小 Size	同质性 Silhouette	年份 Year	聚类标签 Label (LLR)
#0	134	0.865	2005	丛枝菌根真菌; 养分; 紫色土; 根际; 互作; 旱稻; 信号转导; 胁迫; 信号物质; 抑制效应
#1	93	0.815	2006	生长量; 抗旱性; 干旱胁迫; 水分胁迫; 柑橘; 群落结构; 矿质元素; 抗氧化酶; 渗透调节; 耐盐性
#2	89	0.858	2008	生长; 盐胁迫; 黄瓜; 光合作用; 间作; 产量; 光合特性; 烤烟; 品质; 养分吸收
#3	80	0.828	2006	多样性; 根际土壤; 土壤养分; 孢子; 生物修复; 微生物; 西藏高原; 群落组成; 环境因子; 功能
#4	71	0.920	2007	土壤因子; 球囊霉素; 空间分布; 时空分布; 土壤酶; 生态分布; 药用植物; 油蒿; 刺槐; 红壤
#5	71	0.869	2006	重金属; 土壤; 紫花苜蓿; 植物修复; 接种效应; 黑麦草; 菌根修复; 土壤污染; 多环芳烃; 土壤修复
#6	70	0.880	2006	番茄; 矿质营养; 生长效应; 生长发育; 葡萄; 基质; 抗性; 相互作用; 抗病性; 磷水平
#7	68	0.879	2004	侵染率; 菌丝; 孢子萌发; 孢子数; 菌丝生长; 菌丝量; 侵染强度; 类黄酮; am 菌剂; 氮磷比
#8	68	0.817	2006	玉米; 低温胁迫; 棉花; 生理指标; 有机磷; 菌根菌; 竞争; 黄顶菊; 黄萎病; 解磷细菌
#9	59	0.869	2007	孢子密度; 入侵植物; 频度; 菌根类型; 牡丹; 盐碱土; 感染率; 聚类分析; 季节动态; 湿地植物
#10	46	0.905	2007	降解; 植物; 抗逆性; 氮沉降; 精氨酸; 接种; 共生; 矿区; 土壤呼吸; 气候变化
#11	44	0.896	2003	球囊霉属; 新记录种; 原囊霉属; 黄檗; 相对多度; 孢子壁; 形态; 硬囊霉属; 资源调查; 优势种
#12	34	0.962	2004	宿主植物; 羊草; 构树; pH; 光合速率; 接种势; 林木; 磷添加; 气孔导度; 有机质
#13	33	0.849	2006	根瘤菌; 大豆; 白三叶草; 双接种; 植被重建; 矿区复垦; 生态效应; 磷肥; 氮吸收; 镉胁迫
#14	32	0.921	2008	生物量; 滇重楼; 苜蓿; 喜树幼苗; 指纹图谱; 次生代谢; 喜树碱; 可溶性糖; MDA; 甾体皂苷
#15	29	0.969	2005	菌根; 应用; 生物防治; 菌剂; 高温胁迫; 植物营养; 土传病害; 高粱; 污染土壤; 机制
#16	25	0.959	2004	丛枝; 小麦; 内生真菌; 果树; 孢囊; 藏北高原; 外生菌丝; 生物胁迫; 高寒草原; 海拔梯度
#17	23	0.921	2003	三叶草; 烟苗; 菌丝桥; 有效磷; 增殖技术; 肥力; 生长状况; 氮磷营养; 营养传递; 侵染能力
#18	22	0.948	2011	干旱; 石漠化; 耐旱性; 桑树; 生态修复; 营养; 光合参数; 岩溶; 双重胁迫; 抗旱基因

运和分配的主要手段(Miransari 2011)。**聚类#4**的关键词集中于 AM 真菌分类学相关词汇, 例如内囊霉科 Endogonaceae、classification (分类)和 taxonomic concept (分类学概念)。对 AM 分类经历了从形态学到形态与分子生物学相结合的过程, 对 AM 真菌分子生物学鉴定的区域主要集中于 rDNA 和 ITS, 而 PCR 引物的不断开发

使研究者能利用更长的目标片段通过比对获得更准确的分类地位。**聚类#6和#8**的关键词主要涉及根围环境及植物受胁迫后生理指标的变化, 接种 AM 真菌后根际土中脱落酸(abscisic acid)浓度会明显升高, 进一步研究表明, 该分子会促进 AM 真菌丛枝发育(Herrera-Medina *et al.* 2007)。根系渗透系数(hydraulic conductivity)可

以反映植物根系在干旱胁迫下对水分的吸收能力,研究表明AM真菌共生能减缓干旱对根系渗透系数的影响(Sánchez-Romera *et al.* 2016)。

中文关键词中, **聚类#0** 包括的研究范围较广,是一个综合性较强的聚类。**聚类#1、#5、#13、#15 和#18** 以胁迫环境条件下的生态修复为主,研究较多的胁迫包括干旱、水分、盐分、重金属、多环芳烃和高温中的一种或两种;接种方式涉及AM真菌单接种及与根瘤菌双接种;研究方向较多的有矿区重金属污染修复和石漠化及岩溶地区的生态修复。**聚类#2、#6 和#8** 主要涉及接种对经济作物生长生理和抗病性的影响,其中对黄瓜、烤烟、番茄、葡萄、玉米和棉花的研究较多,研究的指标包括生长效应、光合作用、养分吸收和抗病性等。**聚类#3、#4、#9、#11 和#16** 的关键词侧重于野外调查研究,其中#3 以群落多样性与环境的关系为主,包含多样性、土壤养分、孢子和环境因子等。#4 以土壤因子及球囊霉素调查为主,包括土壤因子、空间分布、土壤酶等。#11 的关键词以野外调查过程中的形态学分类为主,出现次数较多的有球囊霉属、新记录种和原囊霉属等。#9 和#16 侧重于不同生境中AM真菌与宿主共生状况调查,其中包括盐碱土、藏北高原和高寒草原等主要生境,牡丹、小麦和果树等宿主植物,以及孢子密度、频度、感染率和丛枝等测定指标。**聚类#7 和#17** 主要利用室内培养装置研究养分传输机理。常用的宿主植物有三叶草和烟草,主要通过分室培养装置等研究菌丝桥在养分传递中的作用。

2.3 研究主体力量分析

2.3.1 地域和机构分布

对AM真菌研究的英文文献绘制宏观的国家合作网络图谱(图3)。在该领域的13 531 篇文献中,作者来自67个国家,为保证图谱的辨识度,隐藏发文量低于50的国家。节点年轮大小表示发文量,节点间连线表示合作情况,有紫

色外圈的节点是具有高中心度的节点。发文量前5的国家依次为美国、中国、德国、印度和西班牙(图3)。其中美国发文量2 396篇,占发文总量17.7%。美国、德国、西班牙、法国和英国有较高的中心度。

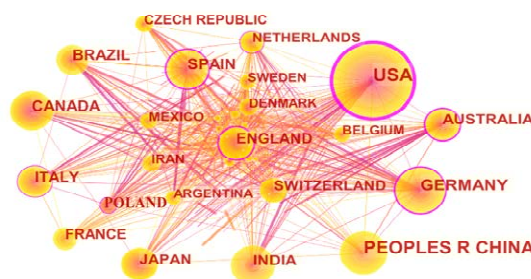


图3 国家合作网络图谱

Fig. 3 The network of cooperation between countries.

利用CiteSpace中的Institution分析功能绘制发文机构合作图谱(图4)和主要发文机构排名表。进一步对英文文献发文量>75和中文文献发文量>15的机构根据中心度排序(表4)。其中英文文献中心度前3的单位均为研究院(所、委员会),其中中国科学院排在第12位。但从发文量来看,中国科学院排在首位。对中文文献排序发现,中国农业大学资源与环境学院和北京市农林科学院植物营养与资源研究所等6个单位的中心度>0.1,在国内AM真菌研究中发挥重要作用。从发文量来看,河北大学生命科学学院和青岛农业大学菌根生物技术研究等4个单位发文量大于50篇,对国内AM真菌相关研究贡献较大。

2.3.2 主要期刊分布

1990年以来,AM真菌相关研究共发表于300余个期刊,其中共被引次数较高的有Mycorrhiza、New Phytologist和Plant and Soil等(表5)。New Phytologist共被引次数和影响因子最高,菌根研究专刊Mycorrhiza发文量最高。由于AM真菌是土壤微生物的重要组成,且与植物关系密切,因此土壤生物界重要期刊Soil



图4 机构合作共现图谱

Fig. 4 The network of institution cooperation.

Biology & Biochemistry 以及植物土壤相互关系领域期刊 Plant and Soil 的共被引次数较高。中文文献主要发表于《生态学报》《菌物学报》和《应用生态学报》等。其中微生物领域期刊只有菌物学报与微生物学通报, 这说明中文文献主要集中于生态学科方面的研究。

2.3.3 主要作者分析

通过综合考虑发文量和中心度客观反映作者对 AM 真菌研究领域的贡献。在英文文献发文量 ≥ 25 的作者中, 选取中心度 ≥ 0.02 的 14 位作者以及中心度为 0.01 中发文量最高的 1 位作者; 中文文献列出中心度 ≥ 0.03 中发文量位于前 15 的作者(表 6)。英文文献发文量和中心度均位居第一的是德国的土壤生物学家 Matthias C. Rillig; 瑞士联邦政府农业、食品和环境研究组织的 Fritz Oehl 也具有较高的发文量和中心度; 来自中国的作者有 2 位, 分别是 Qiangsheng Wu 和 Baodong Chen, 这两位作者在中文文献中也排在前 15 位, 在中英文 AM 真菌研究中均发挥重要作用。英文文献中, 中国长江大学的

Qiangsheng Wu 发文量较高, 排名第 3。在中文文献中, 河北大学的贺学礼发文量最高, 青岛农业大学的刘润进和中国农业大学的李晓林分别排名第 2 和第 3, 且具有较高的中心度(表 6)。

2.3.4 核心文献分析

对中心度 ≥ 0.2 的文献按共被引频次排序发现, 排名前 10 位的文献有 4 篇来自 AM 真菌发文量较高的 10 个期刊, 其余主要来自国际顶级期刊 Science、Nature 以及综述类期刊 Annual Review of Plant Biology 和 Nature Reviews Microbiology, 还有一篇来自菌根学专刊 Mycological Research (表 7)。从文献内容看, 其中有 5 篇与 AM 真菌分类学和系统发育关系有关, 这与 AM 真菌分类学地位及其科属种的频繁变化有关。近年来, 随着分子生物学技术的发展和 AM 真菌特异引物的不断出现, 研究结果不断冲击传统的形态特征结果, 使得 AM 真菌的系统发育关系不断被修正。其余几篇主要集中于 AM 真菌与植物共生机理的研究、AM 真菌对宿主植物的作用以及对 AM 真菌多样性的关注。

表 4 中文和英文主要研究机构中心度和发文章

Table 4 Centrality and number of published papers of major institutions in Chinese and English

英文文献机构 Publishing institution of English articles	国家 Country	中心度 (发文章) Centrality (NP)	中文文献机构 Publishing institution of Chinese articles	中心度 (发文章) Centrality (NP)
西班牙高等学术研究委员会 CSIC	西班牙 Spain	0.12 (458)	中国农业大学资源与环境学院 College of Resources and Environment, China Agricultural University	0.16 (57)
美国农业部农业研究所 USDA ARS	美国 USA	0.10 (178)	北京市农林科学院植物营养与资源研究所 Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences	0.16 (45)
法国国家农业研究院 INRA	法国 France	0.10 (166)	青岛农业大学菌根生物技术研究所 Institute of Mycorrhizal Biotechnology, Qingdao Agricultural University	0.11 (87)
西澳大利亚大学 Univ Western Australia	澳大利亚 Australia	0.05 (197)	中国科学院大学 University of Chinese Academy of Sciences	0.11 (52)
都灵理工大学 Univ Turin	意大利 Italy	0.05 (150)	西南大学资源环境学院 School of Resources and Environment, Southwest University	0.11 (48)
圭尔夫大学 Univ Guelph	加拿大 Canada	0.04 (153)	中国科学院研究生院 Graduate School of Chinese Academy of Sciences	0.11 (21)
意大利国家研究委员会 CNR	意大利 Italy	0.04 (135)	中国科学院南京土壤研究所 Nanjing Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences	0.09 (30)
阿德莱德大学 Univ Adelaide	澳大利亚 Australia	0.04 (132)	西南大学园艺园林学院 School of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University	0.08 (37)
巴塞尔大学 Univ Basel	瑞士 Switzerland	0.04 (108)	河南科技大学农学院 College of Agriculture, Henan University of Science and Technology	0.07 (26)
隆德大学 Lund Univ	瑞典 Sweden	0.04 (96)	西北农林科技大学林学院 College of Forestry, Northwest A&F University	0.06 (49)
加州大学戴维斯分校 Univ Calif Davis	美国 USA	0.04 (95)	内蒙古农业大学林学院 College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University	0.06 (18)
中国科学院 Chinese Acad Sci	中国 China	0.03 (585)	中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院 School of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing)	0.05 (33)
捷克共和国科学院 Acad Sci Czech Republ	捷克 Czech Republic	0.03 (157)	中国科学院生态环境研究中心 Research Center for Eco-Environment, Chinese Academy of Sciences	0.05 (26)
加拿大农业及农业食品部 Agr & Agri Food Canada	加拿大 Canada	0.03 (125)	云南农业大学资源与环境学院 College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University	0.05 (24)
约克大学 Univ York	英国 UK	0.03 (92)	河北大学生命科学学院 College of Life Sciences, Hebei University	0.04 (139)

NP: Number of published papers, the same below.

表 5 AM 真菌研究发文量前十的期刊

Table 5 Top 10 journals publishing most papers on AMF

序号 No.	英文期刊 English journals	发文量 Records	共被引次数 Total cited frequency	影响因子 IF in 2020	中文期刊 Chinese journals	发文量 Records
1	Mycorrhiza	846	7 618	3.069	生态学报	141
2	New Phytologist	692	10 662	8.512	Acta Ecologica Sinica	115
3	Plant and Soil	635	8 829	3.299	菌物学报	84
4	Soil Biology & Biochemistry	462	6 459	5.795	Mycosystema	68
5	Applied Soil Ecology	395	3 855	3.187	应用生态学报	50
6	Biology and Fertility of Soils	227	3 908	5.521	Chinese Journal of Applied Ecology	50
7	Frontiers in Plant Science	202	1 308	4.402	北方园艺	42
8	PLoS One	205	2 534	2.740	Northern Horticulture	42
9	Symbiosis	190	768	1.780	植物营养与肥料学报	37
10	Journal of Plant Nutrition	156	1 096	1.132	Journal of Plant Nutrition and Fertilizer	37
					生态学杂志	
					Chinese Journal of Ecology	
					微生物学通报	
					Microbiology	
					西北植物学报	
					Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica	
					草业学报	
					Acta Prataculturae Sinica	
					草业科学	
					Pratacultural Science	

表 6 主要作者的发文量和中心度

Table 6 Centrality and number of published papers by chief authors

序号 No.	作者 Author	国家 Country	发文量 NP	中心度 Centrality	作者 Author	发文量 NP	中心度 Centrality
1	Matthias C. Rillig	德国 Germany	121	0.05	贺学礼 He XL	142	0.11
2	Fritz Oehl	瑞士 Switzerland	107	0.03	刘润进 Liu RJ	116	0.29
3	Qiangsheng Wu	中国 China	102	0.01	李晓林 Li XL	69	0.33
4	Iver Jakobsen	丹麦 Denmark	68	0.04	毕银丽 Bi YL	59	0.07
5	José-Miguel Barea	西班牙 Spain	66	0.02	冯固 Feng G	53	0.06
6	Silvio Gianinazzi	法国 France	51	0.03	唐明 Tang M	52	0.07
7	Baodong Chen	中国 China	48	0.02	赵丽莉 Zhao LL	48	0.03
8	Paola Bonfante	意大利 Italy	44	0.02	王幼珊 Wang YS	43	0.15
9	Horst Vierheilig	澳大利亚 Australia	39	0.03	林先贵 Lin XG	40	0.11
10	Yves Piché	加拿大 Canada	37	0.02	吴强盛 Wu QS	37	0.04
11	Concepcion Azcón-Aguilar	西班牙 Spain	36	0.04	姚青 Yao Q	34	0.09
12	Joseph B. Morton	美国 USA	29	0.03	陈保冬 Chen BD	32	0.10
13	John C. Dodd	英国 UK	25	0.02	王发园 Wang FY	26	0.03
14	Pål Axel Olsson	瑞典 Sweden	23	0.02	张美庆 Zhang MQ	25	0.04
15	Ian R. Sanders	瑞士 Switzerland	18	0.02	赵斌 Zhao B	24	0.09

表 7 WOS 数据库中 AM 真菌研究文献共被引频次表
Table 7 The cited frequency of papers on AMF in WOS database

作者 Author	期刊 Journal	年份 Year	文献 Title	被引频次 Cited frequency
Krüger M	New Phytologist	2012	Phylogenetic reference data for systematics and phylotaxonomy of arbuscular mycorrhizal fungi from phylum to species level	210
Davison J	Science	2015	Global assessment of arbuscular mycorrhizal fungus diversity reveals very low endemism	197
Kiers ET	Science	2011	Reciprocal rewards stabilize cooperation in the mycorrhizal symbiosis	193
Spatafora JW	Mycologia	2016	A phylum-level phylogenetic classification of zygomycete fungi based on genome-scale data	189
Redecker D	Mycorrhiza	2013	An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota)	154
Parniske M	Nature Reviews Microbiology	2008	Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses	141
Smith SE	Annual Review of Plant Biology	2011	Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales	136
van der Heijden MGA	Nature	1998	Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity	135
Schussler A	Mycological Research	2001	A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution	135
Opik M	New Phytologist	2010	The online database MaarjAM reveals global and ecosystemic distribution patterns in arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota)	125

3 总结与展望

尽管 AM 真菌在土壤中广泛分布，但其与植物专性共生且难以纯培养的特性，使得相关研究起步较晚(Declerck *et al.* 1998; 李晓林和冯固 2001)。本文运用文献计量学的方法，利用CiteSpace分别对 WOS 和 CNKI 数据库中 1990–2020 年中英文文献进行统计和可视化分析，展示了 AM 真菌研究领域的文献数量年变化、研究热点和发展趋势、国家和机构合作网络、核心机构分布、主要作者和核心期刊分析。英文文献在年发文量和增长速度方面均远超过中文文献。美国较高的发文量和中心度表明其在该领域的重要贡献。西班牙、德国、英国和澳大利亚等国家发表的文献也具有较高的中心度。中国的英文文献发文量仅次于美国，但是中心度较低，说明中国在英文文献的总体质量上还有待提高。对核心文献和关键词突现综合分析发现，AM 真菌

研究已有的重要方向包括：分类及系统发育关系(Schüßler *et al.* 2001; Krüger *et al.* 2012)、与宿主植物共生和养分交换机理(Zavalloni *et al.* 2012; Chen *et al.* 2020; Jiang *et al.* 2021)、农林业生产方面对不良环境(干旱、重金属、盐分和病害等)的抵抗(王发园和林先贵 2007; Wang 2017; Nouri *et al.* 2020; Liu *et al.* 2021)以及与其他生物的相互作用(Sharma & Sharma 2016; Hidri *et al.* 2019; Wang *et al.* 2021)。这些研究方向仍然值得进行更深入的研究：

1) 对菌种测序及基因谱系的研究。目前只有不到 10 种 AM 真菌实现基因组测序，样本的有限性使得对该真菌进化、共生及功能相关基因还不能形成规律性认识。对更多菌种基因组的测序不仅能为 AM 真菌的进化地位和不同菌种谱系关系的分析提供更可靠的依据；同一菌种不同菌株的测序还可为揭示 AM 真菌繁殖方式提供证据。

2) 农业和生态修复方面的机理研究及运用。在加快农业可持续发展和提高污染环境的生态修复方面, AM 真菌的运用可以依次从以下 3 方面开展: ①通过传统盆栽培养法结合水培、培养基培养等方法分离与扩繁功能菌种; ②通过分子生物学方法对菌种特定功能(例如元素吸收和转运)作用机理深入分析; ③通过控制实验探究和绘制功能菌种对环境因子(养分浓度、干旱水平和重金属含量等)的适应谱, 为农业开发和运用提供切实可行的指导。

3) 从地下微生物系统的角度出发研究 AM 真菌与其他微生物相互关系。该研究方向可以从 3 个层次开展: ①AM 真菌与其他菌根真菌(例如深色有隔内生真菌)的相互关系及对根内和根际资源的竞争, 这方面研究可以在多种菌根真菌共存的物种中开展; ②AM 真菌与其他微生物(例如 AM 内共生菌、菌丝际微生物)的直接关系和对宿主养分吸收利用的协同作用; ③AM 真菌-宿主-其他微生物三者分泌物之间的相互作用及其调控。

致谢: 感谢华东师范大学博士生杨扬对 Web of Science 数据库中较早年份文献信息的搜索和导出。

[REFERENCES]

- Akiyama K, Matsuzaki K, Hayashi H, 2005. Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature*, 435(7043): 824-827
- Bagy HMMK, Hassan EA, Nafady NA, Dawood MFA, 2019. Efficacy of arbuscular mycorrhizal fungi and endophytic strain *Epicoccum nigrum* ASU11 as biocontrol agents against blackleg disease of potato caused by bacterial strain *Pectobacterium carotovora* subsp. *atrosepticum* PHY7. *Biological Control*, 134: 103-113
- Brundrett M, Bougher N, Dell B, Grove T, Malajczuk N, 1996. Working with mycorrhizas in forestry and agriculture. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra. 1-374
- Cassells AC, Mark GL, Periappuram C, 1996. Establishment of arbuscular mycorrhizal fungi in autotrophic strawberry cultures *in vitro*. Comparison with inoculation of microplants *in vivo*. *Agrochimica*, 16(10): 625-632

- Chen BD, 2002. Role of arbuscular mycorrhizae in alleviation of zinc and cadmium phytotoxicity. PhD Dissertation, China Agricultural University, Beijing. 1-129 (in Chinese)
- Chen E, Liao H, Chen B, Peng S, 2020. Arbuscular mycorrhizal fungi are a double-edged sword in plant invasion controlled by phosphorus concentration. *New Phytologist*, 226(2): 295-300
- Chen MM, Chen BD, Wang XJ, Zhu YG, Wang YS, 2009. Influences of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the growth and ecological stoichiometry of clover and ryegrass grown in monoculture or in mixture at different phosphorus (P) levels. *Acta Ecologica Sinica*, 29(4): 1980-1986 (in Chinese)
- Chen Y, Chen CM, Liu ZY, Hu ZG, Wang XW, 2015. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains. *Studies in Science of Science*, 33(2): 242-253 (in Chinese)
- Cheng JK, Yue MF, Yang HR, Chen BM, Xin GR, 2019. Do arbuscular mycorrhizal fungi help the native species *Bidens biternata* resist the invasion of *Bidens alba*? *Plant and Soil*, 444: 443-455
- Chitarra W, Pagliarini C, Maserti B, Lumini E, Siciliano I, Cascone P, Schubert A, Gambino G, Balestrini R, Guerrieri E, 2016. Insights on the impact of arbuscular mycorrhizal symbiosis on tomato tolerance to water stress. *Plant Physiology*, 171(2): 1009-1023
- Declerck S, Strullu DG, Plenchette C, 1998. Monoxenic culture of the intraradical forms of *Glomus* sp. isolated from a tropical ecosystem: a proposed methodology for germplasm collection. *Mycologia*, 90(4): 579-585
- Dong LJ, Ma LN, He WM, 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi help explain invasion success of *Solidago canadensis*. *Applied Soil Ecology*, 157: 103763
- Herrera-Medina MJ, Steinkellner S, Vierheilig H, Ocampo BJA, García GJM, 2007. Abscissic acid determines arbuscule development and functionality in the tomato arbuscular mycorrhiza. *New Phytologist*, 175(3): 554-564
- Hidri R, Mahmoud OMB, Debez A, Abdellly C, Barea JM, Azcon R, 2019. Modulation of C:N:P stoichiometry is involved in the effectiveness of a PGPR and AM fungus in increasing salt stress tolerance of *Sulla carnosa* Tunisian provenances. *Applied Soil Ecology*, 143: 161-172
- Jiang F, Zhang L, Zhou J, George TS, Feng G, 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance mineralisation of organic phosphorus by carrying bacteria along their extraradical hyphae. *New Phytologist*, 230(1): 304-315
- Karandashov V, Bucher M, 2005. Symbiotic phosphate transport in arbuscular mycorrhizas. *Trends in Plant Science*, 10(1): 22-29
- Krishnamoorthy R, Kim K, Subramanian P, Senthilkumar M, Anandham R, Sa T, 2016. Arbuscular mycorrhizal fungi

- and associated bacteria isolated from salt-affected soil enhances the tolerance of maize to salinity in coastal reclamation soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 231: 233-239
- Krüger M, Krüger C, Walker C, Stockinger H, Schüssler A, 2012. Phylogenetic reference data for systematics and phylotaxonomy of arbuscular mycorrhizal fungi from phylum to species level. *New Phytologist*, 193(4): 970-984
- Li J, Chen CM, 2016. Text mining and visualization in scientific literature. Capital University of Economics and Business Press, Beijing. 1-301 (in Chinese)
- Li M, Jordan NR, Koide RT, Yannarell AC, Davis AS, 2019. Interspecific variation in crop and weed responses to arbuscular mycorrhizal fungal community highlights opportunities for weed biocontrol. *Applied Soil Ecology*, 142: 34-42
- Li XL, Feng G, 2001. Arbuscular mycorrhizal ecophysiology. Chinese Press, Beijing. 1-358 (in Chinese)
- Liu L, Li D, Ma YL, Shen HT, Zhao SM, Wang YF, 2021. Combined application of arbuscular mycorrhizal fungi and exogenous melatonin alleviates drought stress and improves plant growth in tobacco seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40: 1074-1087
- Liu RJ, Chen YL, 2007. Mycorrhizology. Science Press, Beijing. 1-447 (in Chinese)
- Long WW, Wang P, Feng XM, Hu ZJ, Li FD, 2000. Research progress on PGPR/AMF interactions. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 11(2): 311-314 (in Chinese)
- Marschner H, Dell B, 1994. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. *Plant and Soil*, 159: 89-102
- Mathur N, Vyas A, 1995. Influence of VA mycorrhizae on net photosynthesis and transpiration of *Ziziphus mauritiana*. *Journal of Plant Physiology*, 147(3-4): 328-330
- Miransari M, 2011. Arbuscular mycorrhizal fungi and nitrogen uptake. *Archives of Microbiolog*, 193: 77-81
- Morgan JB, Connolly EL, 2013. Plant-soil interactions: nutrient uptake. *Nature Education Knowledge*, 4(8): 2
- Navarro JM, Pérez-Tornero O, Morte A, 2014. Alleviation of salt stress in citrus seedlings inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi depends on the rootstock salt tolerance. *Journal of Plant Physiology*, 171(1): 76-85
- Nouri E, Matiniazadeh M, Moshki A, Zolfaghari A, Rajaei S, Janoušková M, 2020. Arbuscular mycorrhizal fungi benefit drought-stressed *Salsola laricina*. *Plant Ecology*, 221(8): 683-694
- Paskovic I, Soldo B, Ban SG, Radic T, Lukic M, Uric B, Mimica M, Bubola KB, Colla G, Rouphael Y, Major N, Simpraga M, Ban D, Palcic I, Franic M, Grozic K, Lukic I, 2021. Fruit quality and volatile compound composition of processing tomato as affected by fertilisation practices and arbuscular mycorrhizal fungi application. *Food Chemistry*, 359: 129961
- Porcel R, Aroca R, Ruiz-Lozano JM, 2012. Salinity stress alleviation using arbuscular mycorrhizal fungi. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32: 181-200
- Prasad R, Bhola D, Akdi K, Cruz C, KVSS S, Tuteja N, Varma A, 2017. Introduction to mycorrhiza: historical development. In: Varma A, Prasad R, Tuteja N (eds.) *Mycorrhiza - function, diversity, state of the art*. Springer, Berlin. 1-396
- Prasad R, Chhabra S, Gill SS, Singh PK, Tuteja N, 2020. The microbial symbionts: potential for crop improvement in changing environments. In: Tuteja N, Tuteja R, Passricha N, Saifi SK (eds.) *Advancement in crop improvement techniques*. Woodhead Publishing Duxford, United Kingdom. 1-412
- Ren HY, Gao T, Hu J, Yang GW, 2017. The effects of arbuscular mycorrhizal fungi and root interaction on the competition between *Trifolium repens* and *Lolium perenne*. *PeerJ*, 5: e4183
- Riaz M, Kamran M, Fang Y, Wang Q, Cao H, Yang G, Deng L, Wang Y, Zhou Y, Anastopoulos I, Wang X, 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity in metal contaminated soils: a critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 402(15): 123919
- Rocha I, Ma Y, Carvalho MF, Magalhães C, Janoušková M, Vosátka M, Freitas H, Oliveira RS, 2019. Seed coating with inocula of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteria for nutritional enhancement of maize under different fertilisation regimes. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(1): 31-43
- Sánchez-Romera B, Ruiz-Lozano JM, Zamarreño ÁM, García-Mina JM, Aroca R, 2016. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and methyl jasmonate avoid the inhibition of root hydraulic conductivity caused by drought. *Mycorrhiza*, 26: 111-122
- Schüßler A, Walker C, 2011. 7 Evolution of the 'plant-symbiotic' fungal phylum, Glomeromycota. In: Pöggeler S, Wöstemeyer J (eds.) *Evolution of fungi and fungal-like organisms. The Mycota (a comprehensive treatise on fungi as experimental systems for basic and applied research)*. Vol. 14. Springer, Berlin, Heidelberg. 163-185
- Schüßler A, Schwarzott D, Walker C, 2001. A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycological Research*, 105(12): 1413-1421
- Sharma IP, Sharma AK, 2016. Physiological and biochemical changes in tomato cultivar PT-3 with dual inoculation of

- mycorrhiza and PGPR against root-knot nematode. *Symbiosis*, 71(3): 1-9
- Simon L, Bousquet J, Lévesque RC, Lalonde M, 1993. Origin and diversification of endomycorrhizal fungi and coincidence with vascular land plants. *Nature*, 363: 67-69
- Smith SE, Read DJ, 2008. *Mycorrhizal symbiosis*. Academic Press, New York. 1-787
- Song J, Liu XL, 2019. Research progress on international studies on applied ecology based on Web of Science. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30(3): 1067-1078 (in Chinese)
- Spatafora JW, Chang Y, Benny GL, Lazarus K, Smith ME, Berbee ML, Bonito G, Corradi N, Grigoriev I, Gryganskyi A, James TY, O'Donnell K, Roberson RW, Taylor TN, Uehling J, Vilgalys R, White MM, Stajich JE, 2016. A phylum-level phylogenetic classification of zygomycete fungi based on genome-scale data. *Mycologia*, 108(5): 1028-1046
- Subramanian KS, Santhanakrishnan P, Balasubramanian P, 2006. Responses of field grown tomato plants to arbuscular mycorrhizal fungal colonization under varying intensities of drought stress. *Scientia Horticulturae*, 107(3): 245-253
- Tiwari P, Adholeya A, 2002. *In vitro* co-culture of two AMF isolates *Gigaspora margarita* and *Glomus intraradices* on Ri T-DNA transformed roots. *FEMS Microbiology Letters*, 206(1): 39-43
- Venice F, Ghignone S, Salvioli di Fossalunga A, Amselem J, Novero M, Xianan X, Sędziewska TK, Morin E, Lipzen A, Grigoriev IV, Henrissat B, Martin FM, Bonfante P, 2020. At the nexus of three kingdoms: the genome of the mycorrhizal fungus *Gigaspora margarita* provides insights into plant, endobacterial and fungal interactions. *Environmental Microbiology*, 22: 122-141
- Wang FY, 2017. Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in mining-impacted sites and their contribution to ecological restoration: mechanisms and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(20): 1901-1957
- Wang FY, Lin XG, 2007. Role of a buscular mycorrhizae in phytoremediation of heavy metal-contaminated soils. *Acta Ecologica Sinica*, 27(2): 793-801 (in Chinese)
- Wang G, Wang L, Ma F, Yang DG, You YQ, 2021. Earthworm and arbuscular mycorrhiza interactions: strategies to motivate antioxidant responses and improve soil functionality. *Environmental Pollution*, 272(1): 115980
- Wang WX, Shi JC, Xie QJ, Jiang YN, Yu N, Wang ET, 2017. Nutrient exchange and regulation in arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Molecular Plant*, 10(9): 1147-1158
- Wang YS, Zhang SB, Zhang MQ, 2012. Arbuscular mycorrhizal fungi and germplasm resources in China. China Agriculture Press, Beijing. 1-264 (in Chinese)
- Xiang GP, Ning P, Huang W, Shi L, 2016. The migration footprint of industrial ecology research: visualized research based on CiteSpace II. *Acta Ecologica Sinica*, 36(22): 7168-7178 (in Chinese)
- Xue L, Wang ET, 2020. Arbuscular mycorrhizal associations and the major regulators. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 7(3): 296-306
- Zavalloni C, Vicca S, Büscher M, de la Providencia IE, de Boulois HD, Declerck S, Nijs I, Ceulemans R, 2012. Exposure to warming and CO₂ enrichment promotes greater above-ground biomass, nitrogen, phosphorus and arbuscular mycorrhizal colonization in newly established grasslands. *Plant and Soil*, 359: 121-136
- Zhu W, Xiang XQ, Hou LP, Wang BS, Tang LN, 2018. Knowledge mapping analysis of ecological risk research based on CiteSpace. *Acta Ecologica Sinica*, 38(12): 4504-4515 (in Chinese)
- [附中文参考文献]
- 陈保冬, 2002. 丛枝菌根减轻宿主植物锌、镉毒害机理研究. 中国农业大学博士学位论文, 北京. 1-129
- 陈梅梅, 陈保冬, 王新军, 朱永官, 王幼珊, 2009. 不同磷水平土壤接种丛枝菌根真菌对植物生长和养分吸收的影响. *生态学报*, 29(4): 1980-1986
- 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 胡志刚, 王贤文, 2015. CiteSpace 知识图谱的方法论功能. *科学学研究*, 33(2): 242-253
- 李杰, 陈超美, 2016. CiteSpace: 科技文本挖掘及可视化. 北京: 首都经济贸易大学出版社. 1-301
- 李晓林, 冯固, 2001. 丛枝菌根生态生理. 北京: 华文出版社. 1-358
- 刘润进, 陈应龙, 2007. 菌根学. 北京: 科学出版社. 1-447
- 龙伟文, 王平, 冯新梅, 胡正嘉, 李阜棣, 2000. PGPR 与 AMF 相互关系的研究进展. *应用生态学报*, 11(2): 311-314
- 宋洁, 刘学录, 2019. 基于 Web of Science 的国际应用生态学研究进展. *应用生态学报*, 30(3): 1067-1078
- 王发园, 林先贵, 2007. 丛枝菌根在植物修复重金属污染土壤中的作用. *生态学报*, 27(2): 793-801
- 王幼珊, 张淑彬, 张美庆, 2012. 中国丛枝菌根真菌资源与种质资源. 北京: 中国农业出版社. 1-264
- 项国鹏, 宁鹏, 黄玮, 石磊, 2016. 工业生态学研究足迹迁移—基于 CiteSpace II 的分析. *生态学报*, 36(22): 7168-7178
- 祝薇, 向雪琴, 侯丽朋, 王保盛, 唐立娜, 2018. 基于 CiteSpace 软件的生态风险知识图谱分析. *生态学报*, 38(12): 4504-4515